



УДК 621.313.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПРИМЕРЕ ОДНОЙ КООРДИНАТЫ (МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА) ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ТУР-10****MODELLING OF ELECTROMECHANICAL PROCESSES OF ELECTRIC DRIVE ON THE EXAMPLE OF ONE OF THE COORDINATES (THE ROTATION MECHANISM) OF AN INDUSTRIAL ROBOT-MANIPULATOR TUR-10**

**Зюзов Анатолий Михайлович**, д-р техн. наук, профессор каф. Электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Костылев Алексей Васильевич**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Иоффе Игорь Святославович**, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: effect66@mail.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Юнусов Рустам Мингайсинович**, магистрант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: yrm1002912yandex.ru. Тел.: +7 (343) 375-46-46

**Anatoliy Zyuzev**, Doctor Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.m.zyuzev@urfu.ru, Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Alexey Kostylev**, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Igor Ioffe**, Master Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: effect66@mail.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Rustam Yunusov**, Master Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: yrm1002912yandex.ru. Ph.: +7 (343) 375-46-46

**Аннотация:** В статье описываются этапы разработки и подготовки математической модели одной из координат (механизма поворота) кинематики и системы управления электропривода для многосвязного робота манипулятора ТУР-10. Математическая модель включает в себя 3 части моделирования. Первая часть – это создание математической модели системы управления электроприводом робота манипулятора и анализ полученных переходных процессов тока статора, скорости и положения вала двигателя. Вторая часть – это создание математической модели механической системы робота манипулятора. Третья часть – это создание комплексной электромеханической системы робота манипулятора.

**Abstract:** The article describes the stages of development and preparation of mathematical models of kinematics and actuator control for robot manipulator TUR-10. The mathematical model includes 3

stages of modeling. The first step is to create a mathematical model of electric drive control system of the robot manipulator and the analysis of obtained transients of the stator current, speed and position of the motor shaft. The second step is to create a mathematical model of the mechanical system of the robot manipulator. The third stage is the creation of complex electromechanical systems of a robot manipulator.

**Ключевые слова:** многозвенный робот-манипулятор; моделирование электромеханических процессов; механическая часть электропривода; ТУР-10; кинематика робота-манипулятора; система управления двигателем постоянного тока; реверсивный широтно-импульсный преобразователь для ДПТ.

**Key words:** robot manipulator; modeling of Electromechanical processes; the mechanical part of the actuator; TUR 10; the kinematics of the robot manipulator; the control system of DC motor; reversible PWM Converter for DC motors.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в нашей стране сохранилось большое количество манипуляционных устройств, имеющих, как правило, исправную механику и электродвигатель, но управляющая часть которых морально и физически устарела. Поэтому для того чтобы модернизировать силовую часть системы управления электродвигателя, необходимо получить экспериментальные данные переходных процессов электродвигателя, в частности тока статора, скорости и положения вала двигателя с учетом влияния кинематики звеньев многозвенного робота-манипулятора ТУР-10. В данной статье будет рассмотрено математическое моделирование электромеханических процессов на примере промышленного робота манипулятора ТУР-10.

Задача моделирования процессов в сложных механизмах требует применения достаточно серьезного математического аппарата и является, зачастую, недоступной для решения в рамках учебных проектов без применения специальных средств моделирования. В качестве удобного для пользователя инструмента моделирования может быть выбран широко используемые в инженерных задачах пакета MATLAB в среде моделирования Simulink, предлагаемая разработчиками, содержит в своем составе дополнительные наборы инструментов, такие как: SimPowerSystem (моделирование электротехнических устройств) и SimMechanics (моделирование механической части) и программного комплекса систем автоматизированного проектирования Solidworks. Их совместное использование позволяет выполнять моделирование

электропривода, анализируя электромеханические процессы с учетом их взаимного влияния.

В настоящей статье рассматривается пример модели достаточно сложного с точки зрения механической части электропривода многозвенного робота манипулятора ТУР-10. Целью исследования является оценка влияния кинематики механизма робота на электропривод в динамических режимах работы.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТА МАНИПУЛЯТОРА ТУР-10

Математическое моделирование описывается на примере одной из координат, ось вращения которой расположена перпендикулярно относительно станины робота (механизм поворота). Моделирование делится на три части:

Первая часть: Моделирование силовой части электропривода.

Параметры электродвигателя ПЯ-250Ф:

Таблица 1.

Наименование	Величина	Единицы измерения
$U_N$	36	В
$I_N$	10	А
$n_N$	3000	об/мин
$T_M$	15	мс
$M_{\text{пуск}}$	4	Нм
$M_N$	$8 \cdot 10^{-1}$	Нм
$T_{\text{двиг}}$	137	мс

Уравнения для описания математической модели двигателя постоянного тока представлены ниже

$$e_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot u_y, \quad (1)$$

$$e_{\Pi} = e_d + r_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}} + r_{\text{я}} \cdot T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \quad (2)$$

$$m = i_{\text{я}} \cdot \varphi, \quad (3)$$

$$e_d = \omega \cdot \varphi, \quad (4)$$

$$m - m_c = T_j \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

$$\omega = T_{\theta} \frac{d\theta}{dt}, \quad (6)$$

Приняты обозначения относительных величин:  $e_{\Pi}$  – ЭДС силового преобразовательного агрегата,  $k_{\Pi}$  – коэффициент усиления силового полупроводникового преобразовательного агрегата (СПА) в цепи якоря двигателя;  $u_y$  – управляющий сигнал на входе СПА;  $r_{\text{я}}$  – суммарное активное сопротивление цепи якоря электропривода;  $i_{\text{я}}$  – ток якоря двигателя;  $T_{\text{я}}$  – электромагнитная постоянная времени цепи якоря;  $e_d$  – противо-ЭДС якоря двигателя;  $\varphi$  – номинальный поток двигателя;  $\omega$  – угловая скорость вращения якоря двигателя;  $T_j$  – инерционная постоянная времени электропривода;  $m$  – электромагнитный момент двигателя;  $m_c$  – момент статического сопротивления механизма;  $T_{\theta}$  – время;  $\theta$  – угол поворота вала двигателя.

Уравнение (1) описывает характеристику силового полупроводникового преобразователя как управляемого источника питания в цепи якоря двигателя.

Уравнение (2) – это описание якорной цепи в виде уравнения электрического равновесия по 2 закону Кирхгофа для замкнутой цепи.

Последующие уравнения описывают связи электрической части с механической и движение последней.

Система управления двигателем постоянного тока описывается на основе стандартной методики в виде многоконтурной системы подчиненного регулирования [2].

Система автоматического регулирования положения представляет из себя трёх контурную систему. Первый контур – контур регулирования тока якоря, вторая контур – контур регулирования скорости, третий контур – контур регулирования положения.

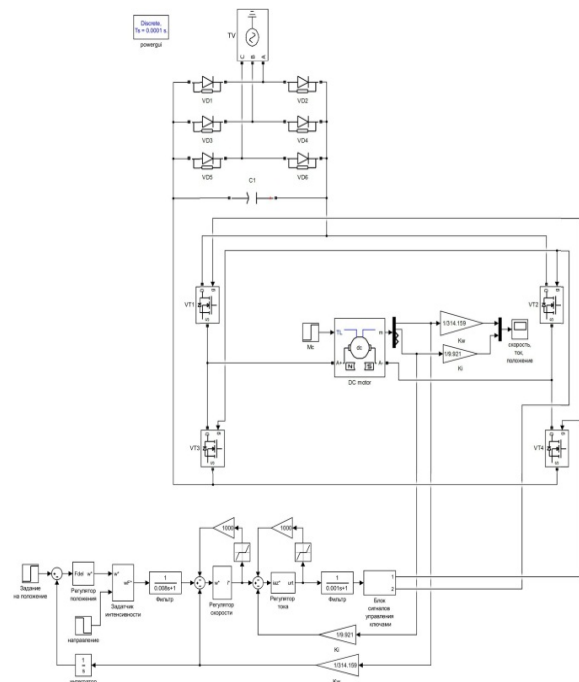


Рис. 1. Структурная математическая модель системы управления робота манипулятора ТУР-10

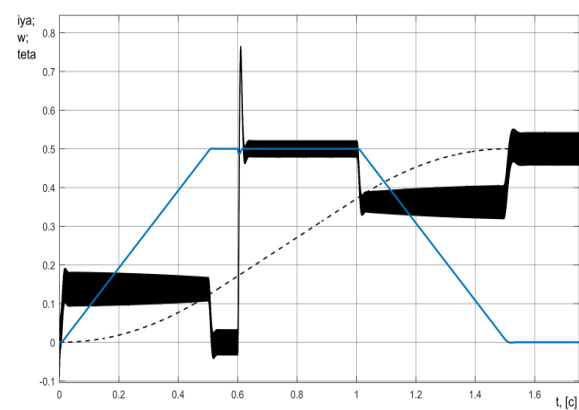


Рис. 2. Переходные процессы тока якоря, положения и угловой скорости

Вторая часть: Моделирование механической части электропривода.

Расчетная кинематическая схема промышленного робота ТУР-10 приведена на рис. 3. В качестве исходных параметров модели задаются массы элементов и их геометрические размеры. При построении модели кинематики прием ряд допущений.

Первое допущение:

- 1) Силы трения в кинематических парах не учитываются
- 2) Звенья механизмов представляют с собой абсолютно твёрдые тела
- 3) Отсутствуют зазоры в кинематических парах

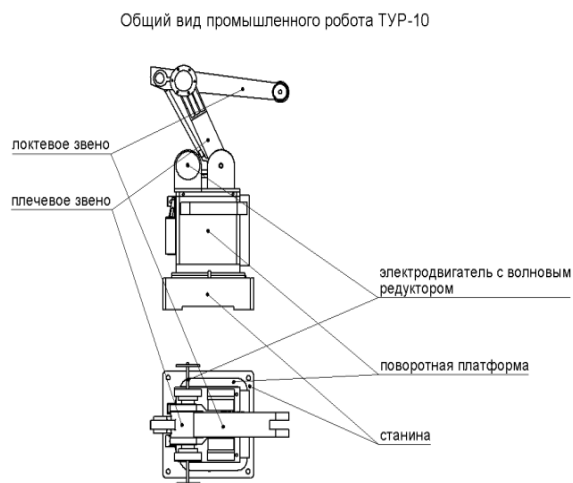


Рис. 3. Общий вид промышленного робота TUR-10

Параметры робота TUR-10

Таблица 2.

Наименование	Величина	Единицы измерения
Масса локтевого звена	60	кг
Масса плечевого звена	48	кг
Масса поворотной платформы	145	кг
Масса станины	133	кг
Общая масса робота	451	кг

Математическое описание кинематических звеньев робота производится с помощью двух программных пакетов: Solidworks и matlab. С помощью программного комплекса систем автоматизированного проектирования Solidworks проектируется 3D модель объекта, в соответствии с его массогабаритными размерами.

Далее при помощи специальной программы Simulink link (которая является дополнительной библиотекой Matlab) происходит конвертирование сборочной модели робота в среду Matlab, содержащая в своем составе дополнительные наборы инструментов, такие как: SimPowerSystem (моделирование электротехнических устройств) и SimMechanics (моделирование механической части). Модель робота-манипулятора составлена из блоков набора SimMechanics [3].

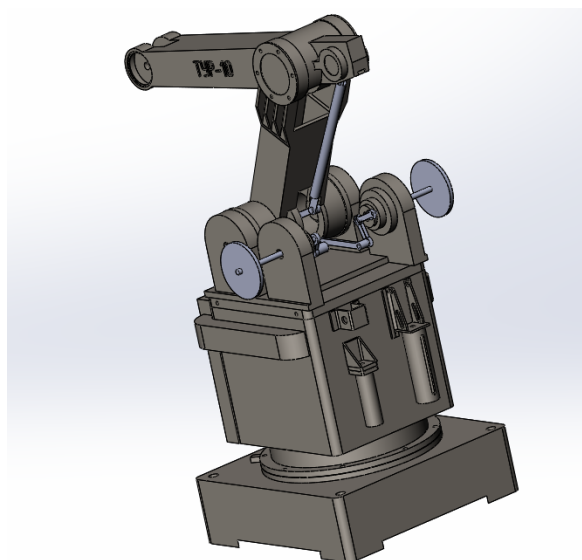


Рис. 4. Графическое представление 3D модели робота TUR-10

Далее при помощи специальной программы Simulink link (которая является дополнительной библиотекой Matlab) происходит конвертирование сборочной модели робота в среду Matlab, содержащая в своем составе дополнительные наборы инструментов, такие как: SimPowerSystem (моделирование электротехнических устройств) и SimMechanics (моделирование механической части). Модель робота-манипулятора составлена из блоков набора SimMechanics [3].

Тела (в данном случае - стержни) модели описываются блоками *Body*. В этих блоках указывается масса, центр масс, моменты инерции, и геометрия тела (длина, ширина и вид объекта). Соединения элементов описаны блоками *Revolute Prismatic Cylindrical Weld*. Блок *Prismatic* представляет собой поступательную степень свободы вдоль заданной оси между двумя телами. Блок *Revolute* описывает тип соединения, при котором тела вращаются друг относительно друга. Блок *Weld* (сварное соединение) указывает на жесткую связь тел. Блок *Prismatic* представляет с собой составной шарнир с одной поступательной степенью свободы, как один призматический примитив и один вращательный примитив. Для задания точки привязки модели или начала системы координат используется блок *Ground*. Взаимодействие блоков набора SimMechanics с традиционными блоками Simulink осуществляется с помощью элементов *Joint sensor* и *Joint actuator*. Элемент *Joint sensor*

(датчик) позволяет наблюдать механические координаты модели, а *Joint actuator* – формировать воздействие на систему в виде усилия или момента. На рис. 5. приводится структурное представление математической

модели механики робота манипулятора ТУР-10 в среде Matlab SimScape SimMechanics

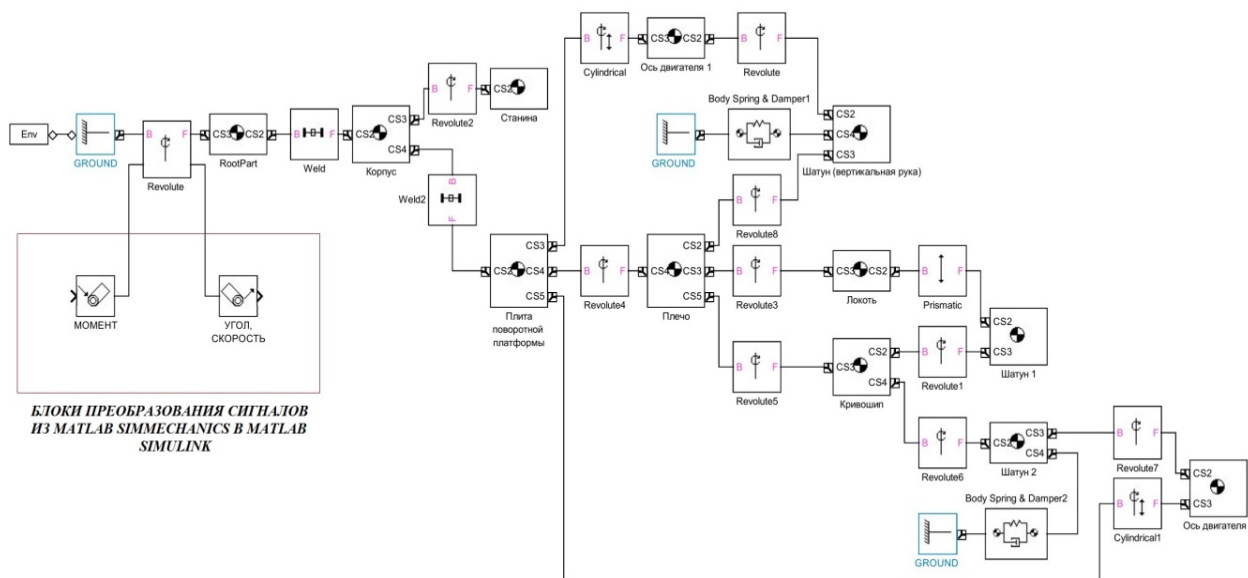


Рис. 5. Структурное представление математической модели механики робота манипулятора ТУР-10 в среде Matlab SimScape SimMechanics

Третья часть: Создание комплексной электромеханической системы робота манипулятора.

В этой части соединяются две предыдущие модели, то есть САР положения и модель механизма поворота робота (ТУР-10). Механическая часть в модели САР положения заменяется на модель кинематики робота, которая получена в Matlab SimScape SimMechanics. В реальном объекте связь между двигателем и механизмом осуществляется через волновой редуктор, в нашей модели этот редуктор представлен в виде коэффициента усиления.

На рисунке 6 представлена общая структурная схема математической модели САР положения с учётом коэффициентов, для преобразования в механическую часть: скорости, момента и угла поворота вала двигателя.

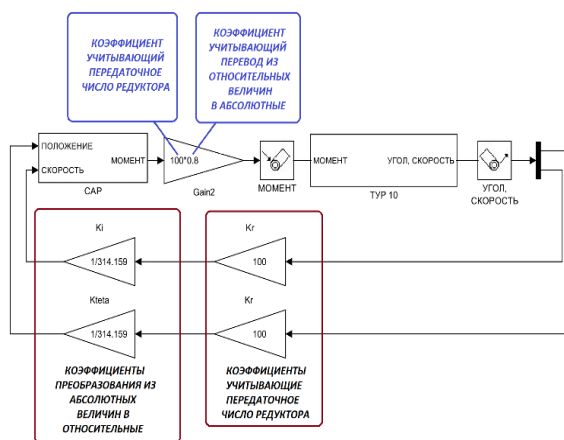


Рис. 6. Структурное представление математической модели САР положения и механизма робота на примере одной координаты (поворота платформы)



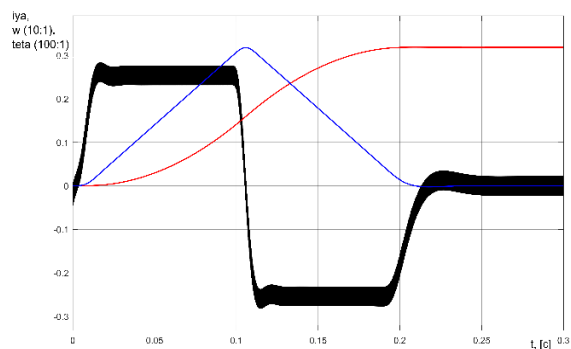


Рис. 7. Переходные процессы тока якоря, скорости и положения вала двигателя для механизма поворота робота ТУР-10

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была разработана математическая модель системы автоматического управления регулированием положения с помощью пакета Matlab библиотек Simulink, SimPowerSystems. Также в статье была разработана полная кинематическая модель промышленного робота ТУР-10, при помощи библиотек Simulink, SimMechanics и программного комплекса систем автоматизированного

проектирования Solidworks. Полученную математическую модель, можно использовать для дальнейших исследований в области проектирования электропривода робота ТУР-10.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костылев А.В., Кириллов А.В., Цибанов Д.В. Процессы в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсной модуляцией. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 71с.
2. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов : учебное пособие для вузов / Р. Т. Шрейнер. - Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2008.
3. Щербаков В.С. Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB: Учебное пособие / В.С.Щербаков, М. С. Корытов, А.А. Руппель, В.А. Глушец, С.А. Милюшенко. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 84с.
4. Мусалимов В.М., Г.Б. Заморюев, И.И. Калапышина, А.Д. Перечесова, К.А. Нуждин. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics): учебное пособие для высших учебных заведений. — СПб: НИУ ИТМО, 2013. — 114 с.